Physikalische Grundlagen der Medizin.

Über den Nachweis der mitogenetischen Strahlung mittels eines Spitzenlichtzählers.

INAUGURAL-DISSERTATION
zur
Erlangung der Doktorwürde
genehmigt
von der philosophischen Fakultät
der Rheinischen Friedrich Wilhelms-Universität
zu Bonn

Von
ALOYS KROST
aus Roth.

1 9 3 6

DISSERTATIONS-VERLAG G. H. NOLTE DÜSSELDORF

Berichterstatter: Professor Dr. L. Grebe.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

MEINEN LIEBEN ELTERN

Allgemeines.

Die Anwendung des Geiger-Müllerschen Zählrohres als Lichtzähler ist bereits mehrfach durchgeführt worden. In der Form, wie es von Geiger und Müller (1) angegeben wurde, eignete es sich zunächst nur zum Nachweis von Korpuskularstrahlen, Gammastrahlen und harten Röntgenstrahlen, also von Strahlenqualitäten, die die Wand des Zählrohrs zu durchdringen vermögen. Dieses Prinzip des Zählrohrs läßt sich ohne besondere Schwierigkeiten auf längerwellige Strahlen ausdehnen. Zu diesem Zweck muß man durch ein geeignetes Fenster den Strahlen Eingang in das Innere des Zählrohrs verschaffen und die Wand des Rohrs aus einem Material herstellen, das für die zu untersuchende Strahlung eine genügende lichtelektrische Empfindlichkeit aufweist.

Dieser Weg ist zuerst von Rajewsky (2) mit Erfolg beschritten worden. Er vermochte ein Zählrohr herzustellen, mit dem man noch so geringe Strahlungsenergien nachweisen kann, auf die eine übliche Photozelle nicht mehr anspricht. Die Überlegenheit des Zählrohrs gegenüber der Photozelle liegt darin, daß es jedes ausgelöste Photoelektron sofort anzeigen kann, während man bei der üblichen Photozellenschaltung eine beträchtliche Anzahl von Photoelektronen addieren muß, um sie sichtbar zu machen.

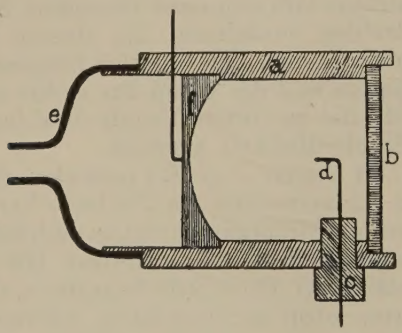
Seither sind Zählrohre dieser Art zu zahlreichen Versuchen benutzt worden, so zum Beispiel von Hausser und Kreuchen (3) 1934 und (4) 1935. Rajewsky hat das von ihm gebaute Zählrohr besonders in den konstruktiven Einzelheiten weiter entwickelt und ihm nach dem jeweiligen Verwendungszweck eine verschiedene äußere Form und innere Gestaltung gegeben (5). Eine weitere Möglichkeit zum Nachweis geringer Strahlungsintensitäten ergibt sich, wenn man einen Lichtzähler nach der Art des Geigerschen Spitzenzählers verwendet, wie er von Bachem (6) und unabhängig davon von Sturm (7) beschrieben wurde. Die Wirkungsweise ist bei beiden Anordnungen dieselbe, und im allgemeinen bereitet es keine allzu großen Schwierigkeiten, einen brauchbaren Lichtzähler der ersten oder zweiten Art zu bauen und zum Zählen zu bringen.

Die Form des Lichtzählers.

Die Verwendung von Spitzenlichtzählern hat gegenüber der zylindrischen Zählrohrform nach Rajewsky den Vorteil, daß sich mit verhältnismäßig einfachen Mitteln eine empfindliche Zählanordnung herstellen läßt. Außerdem wird durch die Verkleinerung der

wirksamen Kathodenoberfläche die spontan auftretende Dunkelstoßzahl, die durch Höhenstrahlung bedingt ist und proportional der der Strahlung ausgesetzten Oberfläche des Zählrohrs zunimmt, weitgehendst herabgesetzt.

Auf Grund der guten Erfahrungen, die Bachem[1]) mit dem Spitzenlichtzähler, dessen Gehäuse aus Hartgummi hergestellt war, gemacht hat, schien es günstig, einen Zähler dieser Art für die folgenden Untersuchungen zu verwenden. Nach einigen Änderungen ergab sich die endgültige äußere Form des Lichtzählers, wie sie aus der folgenden Figur 1 zu ersehen ist.



Figur 1.

(a) ist ein zylindrisches Gehäuse aus Hartgummi, das nach vorn durch eine Quarzplatte aus geschnittenem Bergkristall abgeschlossen ist (b). Die Kathode (f) hat die Gestalt einer Kugelkalotte und besteht aus reinem Kadmium. Die Anode (d) ist mittels eines Stopfens aus Trolitul (c) in das Hartgummigehäuse eingelassen. Auf diese Weise läßt sich ein bequemes Auswechseln der Anode ermöglichen. Sie besteht aus einem Platindraht, dessen Länge so bemessen ist, daß seine Spitze sich in dem Krümmungsmittelpunkt der Kathode befindet. Den Abschluß bildet ein Ansatz aus Glas (e), der zum Manometer und zur Pumpe führt. Der innere Durchmesser des Gehäuses beträgt 3,4 cm, der Krümmungsradius der Kathode ist 2,5 cm, und der Flächeninhalt der der Bestrahlung ausgesetzten Fläche beträgt 7—8 cm^2.

Die Verwendung einer besonderen Isolationsbuchse aus Trolitul zeigte sich aber auch deshalb als notwendig, weil Hartgummi durch Verunreinigungen, besonders an der Oberfläche, leitend wird und den hohen Anforderungen, die man an das Isolationsmaterial stellen

1) Die Anregung zu dieser Arbeit gab Herr Professor Dr. L. Grebe.

muß, nicht mehr genügt. Es läßt sich dann in dem Zähler eine abreißende Entladung auch durch Vergrößerung des Ableitwiderstandes nicht mehr einstellen, sondern es tritt bei einer durch den Druck bestimmten Spannung eine selbständige Glimmentladung auf.

Der Rand der Kathode darf nicht zu ausgeprägt sein, da sonst leicht eine Spitzenwirkung auftritt. Er wurde deshalb abgerundet, um einen bevorzugten Übergang der Entladung dorthin zu vermeiden. Die Kathode wurde erst nach einer sorgfältigen Politur mit feinem Schmirgel und Wiener Kalk in den Zähler eingebaut. Die Verunreinigungen, die besonders durch das in dem Poliermittel enthaltene Fett verursacht sind, wurden vorher mit Aceton entfernt.

Eine vollständige Isolierung der Anode, wie sie Bachem vorschlägt, erwies sich als unzweckmäßig, da infolge der Aufladung des Hartgummigehäuses die Isolationsschicht leicht durchbrochen wird und dadurch ein einwandfreies Arbeiten des Lichtzählers beeinträchtigt wird. Es wurden einige Versuche mit verschiedenen Spitzen gemacht, die aus anderen Metallen hergestellt waren. Dabei zeigte es sich, daß Stahlspitzen von Grammophonnadeln vollkommen ungeeignet waren. Einer Platinspitze fast gleichwertig erwiesen sich Spitzen aus Kupferdraht. Sie hatten nur den einen Nachteil, daß sie leicht oxydierten und dadurch die Empfindlichkeit des Lichtzählers herabsetzten. Besonders ist darauf zu achten, daß die Anode möglichst genau im Krümmungsmittelpunkt der Kathode angebracht ist. Reicht die Spitze zu nahe an diese heran, so werden die Elektronen, die am Rand der Kathode ausgelöst werden, nicht mehr gleichmäßig von der Anode erfaßt, was eine Verkleinerung der wirksamen Kathodenoberfläche zur Folge hat.

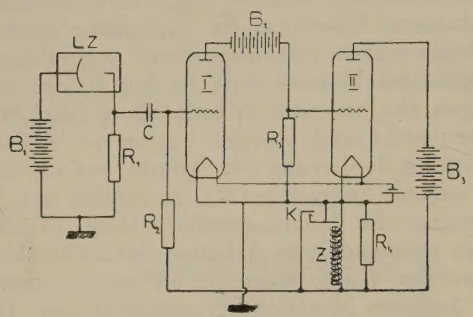
Die Verstärkung.

Zur Verstärkung der in dem Lichtzähler ausgelösten Stromstöße wurde ein besonderer Zweiröhrenverstärker gebaut, dessen Schaltungsschema [2]) und Anschluß an den Lichtzähler in Figur 2 dargestellt ist.

Als Verstärkerröhren wurden benutzt eine RE 034 (I) und eine RE 114 (II). Als Hochspannungsquelle erwies sich für die Vorversuche ein Hochspannungstransformator, verbunden mit einem Glühventil als Gleichrichter, als durchaus brauchbar. An die Sekundärklemmen des Transformators war über ein Glühventil und einen hohen Widerstand ein Kondensator von 0,05 Mikrofarad angeschlossen. Die beiden Klemmen des Kondensators lieferten dann die erforderliche Gleichspannung für den Lichtzähler. Die Höhe der Spannung konnte durch einen primärseitig eingebauten Spannungsteiler bequem einreguliert werden. Allerdings traten infolge der Inkonstanz der primären Netzspannung bei längeren Meßreihen zu

2) Herrn Dozenten Dr. Schmitz bin ich zu Dank verpflichtet für die Anregung zu diesem Schaltschema.

große Schwankungen der Stoßzahl auf. Aus diesem Grunde wurde bei den späteren Messungen zum Nachweis der mitogenetischen Strahlung eine Anodenbatterie als Hochspannungsquelle benutzt.



Figur 2.

B_2 ist eine Anodenbatterie von 60—80 Volt, B_3 eine solche von 120—150 Volt. Die Daten der Widerstände sind: $R_1 = 2—6 \cdot 10^8$ Ohm, $R_2 = 1$ Megohm, $R_3 = 0{,}5$ Megohm, $R_4 = 5000$ Ohm. Das Zählwerk Z ist ein Telephongesprächszähler, der auf ungefähr 5000 Ohm umgewickelt wurde. Die Bedeutung des Kontaktes K wird weiter unten beschrieben. Die Größe der Kapazität C betrug 50 cm.

Die Wirkungsweise des Verstärkers ist folgende: im Ruhezustand hat das Gitter der Röhre I das Potential des negativen Endes des Heizfadens. Infolgedessen kann in der Röhre I ein Strom fließen, der an dem Widerstand R_3 einen Spannungsabfall bewirkt. Die Anodenspannung der Röhre I ist nun so gewählt, daß dieser Spannungsabfall dem Gitter der Röhre II eine so hohe negative Vorspannung erteilt, daß ein Stromfluß in der Röhre II vollkommen gesperrt wird. Sobald nun im Lichtzähler ein Stromstoß ausgelöst wird, erhält das Gitter der Röhre I eine kleine negative Vorspannung, durch die der Strom in der Röhre I geschwächt wird. Infolgedessen wird auch der Spannungsabfall an dem Widerstand R_3 und damit die negative Vorspanung der Röhre II kleiner. Es beginnt nun in der Röhre II ein Strom zu fließen, der seinerseits an dem Widerstand des Zählwerks einen Spannungsabfall bewirkt. Dieser Spannungsabfall erteilt aber dem Gitter der ersten Röhre eine höhere negative Vorspannung. Infolgedessen wird der Strom in der Röhre I weiter verkleinert und die negative Gittervorspannung der zweiten Röhre herabgesetzt. Dies hat zur Folge, daß in der Röhre II der Strom größer wird, der an dem Widerstand des Zählwerks einen größeren Spannungsabfall und damit an dem Gitter der Röhre I eine noch höhere negative Vorspannung bewirkt.

Auf diese Weise schaukelt sich der Strom in der Röhre II immer mehr auf, bis er seinen Sättigungswert erreicht hat. In diesem Augenblick ist der Eisenkern in der Spule des Zählwerks genügend stark magnetisiert, sodaß er den Anker des Zählwerks anziehen kann. Durch diesen wird dann der Kontakt K geschlossen. Hierdurch wird aber der Spannungsabfall am Zählwerk erzwungenerweise zu Null. Es liegt also von nun an das Gitter der ersten Röhre unmittelbar an dem negativen Ende des Heizfadens. Damit ist der Anfangszustand wieder erreicht und das Zählwerk stromlos. Der Anker fällt jetzt zurück, und der Verstärker ist zur Aufnahme eines neuen Zählstoßes bereit.

Die Stromstöße werden also nicht unmittelbar verstärkt wie etwa durch einen Widerstandsverstärker, sondern sie werden bei einer Kippschaltung nur zur Steuerung eines zweiten Stromkreises benutzt, in dem sie dann durch ein Zählwerk registriert werden. Mit dieser Anordnung ist es prinzipiell möglich, beliebig viele Stromstöße anzuzeigen, soweit nicht das Auflösungsvermögen durch die Vorgänge des Spannungsausgleichs im Lichtzähler und die mechanische Trägheit des Zählwerks beschränkt ist. Es kann jedenfalls keine Verzögerung in der Aufzeichnung der Stromstöße durch kapazitive Aufladungen erfolgen, wie es bei Verwendung von Widerstandsverstärkern möglich ist.

Ein kleiner Schönheitsfehler läßt sich bei dem beschriebenen Zweiröhrenverstärker nicht vermeiden, nämlich der, daß man für die beiden Röhren zwei getrennte Anodenbatterien verwenden muß. Dieser Umstand fällt aber kaum ins Gewicht gegenüber den Vorzügen, die diese Anordnung mit sich bringt.

Ein Vorteil dieser Verstärkeranordnung ist der, daß man bei dieser Schaltung mit zwei Verstärkerröhren auskommt, während man bei Widerstandsverstärkern drei bis vier Verstärkungsstufen benötigt, um die Stromstöße durch ein mechanisches Zählwerk anzuzeigen. Außerdem kommt es bei Verstärkern dieser Art auf die richtige Wahl der Gitterableitwiderstände und vor allem der Gitter- und Anodenspannung jeder einzelnen Röhre an, um ein einwandfreies Arbeiten des Verstärkers, besonders bei hohen Stoßzahlen, zu gewährleisten. All diese Nachteile fallen bei der beschriebenen Anordnung fort. Außerdem ist die Registrierung durch das Zählwerk unabhängig von der Größe der einzelnen Stromstöße.

Bei der Übertragung der Stromstöße auf den Verstärker ist eine richtige Auswahl der Kopplungskapazität nötig. Die Stromstöße im Zähler selbst sind sehr kurz. Der Spannungsausgleich am Zähler nach dem Ansprechen dauert jedoch je nach der Größe des Ableitwiderstandes eine längere Zeit. Nach Bothe (8) verläuft er nach einer Exponentialkurve, die je nach der Größe des Hochohmwiderstandes steiler oder flacher abfällt. Durch Einschaltung einer kleinen Kapazität zwischen den Lichtzähler und Verstärker wird diese Kurve dahingehend verändert, daß sie in ihrem Anfang wesentlich steiler ab-

fällt. Das bedeutet aber, daß die Spannung in sehr viel kürzerer Zeit ihren normalen Wert nahezu wieder erreicht und daß die Stromstöße im Lichtzähler schneller aufeinander folgen können.

Im allgemeinen wird man also mit einer möglichst kleinen Kopplungskapazität die günstigsten Ergebnisse erzielen. So zeigte sich bei den Versuchen, daß eine Kapazität von 2000 cm viel zu groß war. Wurde sie von 2000 cm auf 50 cm verkleinert, so ergab sich eine Erhöhung der Stoßzahl um das 15-fache. Ein Versagen oder ein unbefriedigendes Arbeiten des Lichtzählers ist meistens dadurch bedingt, daß die Kopplungskapazität den Dimensionen des Zählers nicht genügend angepaßt ist.

Die Arbeitsbedingungen des Lichtzählers.

Der Ableitwiderstand konnte in den Grenzen zwischen 2—$6 \cdot 10^8$ Ohm variiert werden, ohne daß bei einer Bestrahlung mit gleichbleibender Intensität die Stoßzahl sich merklich änderte. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu dem von Bachem, der für einen Spitzenlichtzähler einen genau abgestimmten Widerstand fordert. Als Widerstand dienten handelsübliche Dralowidwiderstände von je 100 Megohm.

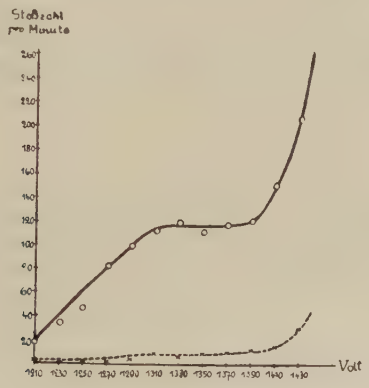
Wurde der Ableitwiderstand über $6 \cdot 10^8$ Ohm vergrößert, so sank die Stoßzahl langsam ab, da der Spannungsausgleich im Zähler zu sehr in die Länge gezogen wurde. Andererseits wurden bei einer Verkleinerung des Widerstandes unter $2 \cdot 10^8$ Ohm die Stromstöße nicht mehr exakt unterbrochen, und bei einer weiteren Herabsetzung auf $6 \cdot 10^7$ Ohm war überhaupt keine unterbrechende Entladung mehr einzustellen. An sich müßte eine Verkleinerung des Ableitwiderstandes sich günstig auf den Zählvorgang auswirken, da bei einem kleineren Widerstand die Stromstöße schneller abklingen und der Lichtzähler nach einer kürzeren Zeit wieder zur Auslösung eines neuen Stromstoßes bereit ist. Aber wie die obigen Versuche zeigen, läßt sich der Widerstand nur bis zu einer gewissen Grenze herabsetzen, wenn ein einwandfreies Arbeiten des Lichtzählers gewährleistet sein soll.

Benutzt man Luft als Füllgas für den Zähler, so liegt der günstigste Zähldruck bei ungefähr 2 mm. Das Arbeiten bei einem solch niedrigen Druck hat den Vorteil, daß man zum Betrieb des Zählers mit einer verhältnismäßig geringen Spannung (etwa 800 Volt) auskommt. Ein großer Nachteil ist jedoch der, daß bei diesem Druck der Spannungsbereich, innerhalb dessen die Stoßzahl konstant bleibt, eng begrenzt ist; er beträgt höchstens 20 Volt. Die Betriebsspannung auf diesen kleinen Spannungsbereich einzustellen, ist besonders bei inkonstanten Spannungsquellen fast unmöglich, zum mindesten aber sehr unbequem. Ein weiterer Nachteil ist der, daß die lichtelektrische Schicht in Luft leicht oxydieren kann, was sich

auf die Empfindlichkeit des Zählers ungünstig auswirkt. So ließ die Empfindlichkeit schon nach 4—5 Tagen in so starkem Maße nach, daß die Kadmiumkathode von der Oxydschicht befreit werden mußte.

Wegen der eben erwähnten ungünstigen Bedingungen wurde als Füllgas Wasserstoff benutzt, der nach einer vorhergehenden Evakuierung des Zählers in diesen eingelassen wurde. Eine Oxydation der lichtelektrischen Schicht konnte nun nicht mehr stattfinden, und die Empfindlichkeit des Zählers blieb über einen Monat konstant. Die Verwendung von Wasserstoff als Füllgas hatte auch eine Veränderung der Arbeitsbedingungen zur Folge. Der günstigste Zähldruck lag jetzt bei 17—20 mm, und die Betriebsspannung mußte von 800 auf ungefähr 1300 Volt heraufgesetzt werden. Die Breite des konstanten Zählbereichs stieg von 20 auf 90 Volt an, sodaß die Einstellung der richtigen Spannung keine Schwierigkeit mehr bot.

In Figur 3 zeigt die obere Kurve die Abhängigkeit der Stoßzahl von der Spannung bei einem Druck von 18 mm. Aus der unteren Kurve sind die dazugehörigen Dunkelstoßzahlen zu ersehen.



Figur 3.

Die geringe Zahl der Dunkelstöße ist zunächst einmal durch die kleine Flächenausdehnung der Kathode bedingt. Außerdem ist der Gasraum, in dem die Höhenstrahlung ionisierend wirken kann, auf einen eng begrenzten Stoßraum beschränkt, der sich kegelförmig von der Spitze der Anode zum Rand der Kathode erstreckt. Jedoch ist für die Dunkelstöße nicht allein die Höhenstrahlung verantwortlich zu machen, vielmehr werden sie nach Sturm (7) im wesentlichen durch mikroskopisch kleine Spitzen oder Kanten hervorgerufen, die eine Spitzenwirkung ausüben. Der Lichtzähler hat außerdem die Eigenschaft, daß er sich durch die nach Greiner (9) bei jeder Entladung auftretende äußerst kurzwellige Strahlung zu einer

neuen Entladung anregen kann. Für diese Auffassung spricht die Beobachtung, daß bei der Dunkelstoßzählung vielfach zwei und mehrere unmittelbar aufeinanderfolgende Stöße auftraten.

Die Empfindlichkeit.

Die Empfindlichkeit des Lichtzählers wurde mit einer Quecksilberquarzlampe bestimmt, deren Linien ultraviolette Strahlung mittels eines Monochromators in einzelne Linien zerlegt und durch Glasfilter geschwächt wurde. Durch eine genügende Anzahl von Blenden und möglichst weitgehende Verengung des Eingangsspaltes war für die Beseitigung des Streulichts gesorgt. Zur Eichung des Zählers wurden die Quecksilberlinien 3120, 3020, 2800 und 2650 Angström benutzt. Als Filter eigneten sich für die Linien 3120 und 3020 AE Objektträgerglas von 1 mm Dicke, für die Linien 2800 und 2650 AE Objektdeckglas von 0,1 mm Dicke.

Die absolute Strahlungsenergie der einzelnen Linien wurde bestimmt mit einer kleinen Thermosäule nach Moll, verbunden mit einem Zernicke-Spiegelgalvanometer (Typ Zc). Der Ausgangsspalt des Momochromators wurde durch eine Quarzlinse auf die Lötstellen der Thermosäule scharf abgebildet. An dieselbe Stelle wurde später die lichtempfindliche Schicht des Lichtzählers gebracht. Die Eichung der Thermosäule geschah mit der Hefnerlampe nach der Anordnung von Gerlach (10).

Die Gesamtstrahlung der Hefnerlampe in 1 m Entfernung, gemessen in der Höhe der Flammenmitte, beträgt $2{,}312 \cdot 10^{-5}$ cal/cm²sec oder $9{,}66 \cdot 10^{-5}$ Watt/cm². Der Abstand Flamme—Thermosäule betrug 68,8 cm, die Energie in dieser Entfernung ist also nach dem quadratischen Abstandsgesetz $2{,}041 \cdot 10^{-4}$ Watt/cm². Diese Energie bewirkte einen Galvanometerausschlag von 183 Skalenteilen. Demnach entsprach einem Skalenteil eine Strahlungsenergie von 1,112 Watt/cm². Die Strahlungsenergie der einzelnen Linien und die Durchlässigkeit der Filter ist aus der folgenden Tabelle zu ersehen:

Linien	Galvanometerausschläge ohne - Filter - mit		Energie in Watt/cm²	Durchlässigkeit der Filter
3120	34,1	16,2	$3{,}80 \cdot 10^{-5}$	47,5%
3020	25,5	9,9	$2{,}83 \cdot 10^{-5}$	38,8%
2800	6,7	2	$7{,}47 \cdot 10^{-6}$	29,8%
2650	14,0	1	$1{,}56 \cdot 10^{-5}$	7,1%

Die Empfindlichkeit des Lichtzählers gibt die nächste Tabelle an:

Linien	Zahl der Filter	Durchgelassene Energie in Watt/cm²	Zahl der Stromstöße pro Minute
3120	15	$5{,}37 \cdot 10^{-10}$	28
3020	14	$5{,}04 \cdot 10^{-11}$	32
2800	16	$4{,}58 \cdot 10^{-15}$	37
2650	11	$2{,}87 \cdot 10^{-18}$	24

Dabei betrug die Dunkelstoßzahl 11 pro Minute. Die Empfindlichkeit des Lichtzählers nimmt also vom langwelligen zum kurzwelligen Ultraviolett sehr stark zu. Berücksichtigt man die Zahl der Dunkelstöße pro Minute, so wird für die Linie 2650 AE eine Energie von $2{,}87 \cdot 10^{-18}$ Watt/cm² oder ungefähr 4 Quanten/cm²sec noch mit 13 Stößen pro Minute angezeigt.

Um die örtliche Verteilung der Wirksamkeit der Kathode des Lichtzählers festzustellen, wurde ein dünnes Lichtbündel quer über die Kathode hinweggeführt. Dabei zeigte es sich, daß die Stoßzahl und damit die photoelektrische Empfindlichkeit des Zählers von der Mitte der bestrahlten Fläche nach dem Rande hin konstant blieb.

Die Eichung der Thermosäule nach der Methode von Gerlach gibt eine Genauigkeit von etwa 2 Prozent. Der Fehler geht in derselben Größenordnung in das Endresultat ein bei der Empfindlichkeitsbestimmung des Zählers, er hat also praktisch keinen großen Einfluß auf dieses. Ein Fehler bei der Durchlässigkeitsbestimmung der Filter wirkt sich schon schlimmer aus. Aus diesem Grunde wurde jedes der für die Messung der Empfindlichkeit des Zählers für die Linie 2650 AE benutzten Filter auf seine Durchlässigkeit geprüft. Dabei ergab sich der in der Tabelle angegebene Mittelwert von 7,1 Prozent. Selbst wenn man für die Durchlässigkeit den größten gemessenen Wert von 7,5 Prozent einsetzt, so ergibt sich für die nachgewiesene Energie der immerhin noch geringe Betrag von $6{,}59 \cdot 10^{-18}$ Watt/cm² oder etwa 9 Quanten/cm²sec.

Der Nachweis der mitogenetischen Strahlung.

Es wurde nun versucht, die von Gurwitsch (11) entdeckte mitogenetische Strahlung mit dem Spitzenlichtzähler nachzuweisen. Für die Existenz dieser Strahlung spricht eine große Zahl von biologischem Beobachtungsmaterial. Nach Chariton, Frank und Kannegießer (12) ist die mitogenetische Strahlung eine ultraviolette Strahlung im Wellenlängenbereich 1900—2650 AE, also in einem Bereich, in dem die Empfindlichkeit des beschriebenen Lichtzählers besonders groß ist und gewiß zum Nachweis der Strahlung ausreichen muß.

Die Frage, ob sich die mitogenetische Strahlung physikalisch nachweisen läßt, hat zu mannigfachen Versuchen Anlaß gegeben, das Zählrohr dieser Aufgabe nutzbar zu machen. Leider ist es bis heute noch nicht möglich gewesen, aus all den Untersuchungen, deren Resultate sich vielfach widersprechen, eine entscheidende Klärung der Frage nach der Existenz einer biologischen Strahlung zu gewinnen.

Den ersten Nachweis der mitogenetischen Strahlung auf physikalischem Wege erbrachte Rajewsky (2) mittels des von ihm konstruierten Lichtzählers im Jahre 1931. Seine Messungen an Zwiebelwurzeln, Zwiebelsohlenbrei und Karzinomgeweben ergaben in

Anwesenheit dieser Strahler eine Erhöhung der Stoßzahl um 5—30 Prozent gegenüber der Dunkelstoßzahl.

Seither sind ähnliche Versuche von anderen Forschern öfters wiederholt worden mit teils positivem, teils negativem Erfolg. So führten Versuche, die von Sturm (7) angestellt wurden, zu einer Bestätigung der Ergebnisse von Rajewsky, während die Untersuchungen von Schreiber und Friedrich[3]) und Bachem (6) negativ ausfielen. Aus welchem Grunde diese Versuche ein negatives Ergebnis zeigten, ist schwer zu entscheiden. Die Ursache kann an der ungenügenden Empfindlichkeit der benutzten Meßanordnung liegen, sie kann aber auch darin zu suchen sein, daß die bei diesen Versuchen benutzten biologischen Strahlungsquellen für den physikalischen Nachweis der mitogenetischen Strahlung sich nicht eigneten.

Die negativen Ergebnisse von Schreiber und Friedrich sind vielleicht auf den Umstand zurückzuführen, daß sie als Strahlungsquelle Hefeagarkulturen benutzten, die nach einer Arbeit von Potozky[4]) in völliger Dunkelheit nicht strahlen. Messungen an einigen anderen Objekten, die später von Rajewsky angestellt wurden, hatten auch zum Teil keinen Erfolg. Sie ergaben negative oder wechselnde Resultate, deren Ursache noch nicht geklärt ist.

Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Versuche wurden angestellt mit Zwiebelwurzeln, Zwiebelsohlenbrei, Helianthuskeimlingen, Helianthuswurzeln, Erbsenwurzeln, Kartoffelknollen, Hyazinthenwurzeln, Kaulquappenbrei und Hefeagarkulturen. Bei allen Präparaten, außer den Hefekulturen, zeigte sich ein positives Ergebnis.

Die Versuchsobjekte wurden Zimmerkulturen entnommen, die etwa 8—14 Tage alt waren. Es sei ausdrücklich betont, daß sie in keiner Weise vorbehandelt wurden, etwa durch Bestrahlung mit einer Quecksilber- oder Kohlebogenlampe. Die Wurzeln wurden sorgfältig vor Beschädigung geschützt und durch vorsichtiges Abspülen mit Wasser von der anhaftenden Erde befreit. Bei den Messungen wurden die Wurzeln mit etwas Wasser befeuchtet, in eine Glaskapillare gesteckt und mit der Spitze nach vorn unmittelbar vor den Lichtzähler gelegt. Einige Wurzeln zeigten noch nach tagelanger Aufbewahrung in Wasser eine deutlich nachweisbare Strahlung.

Die Messungen wurden bei elektrischer Zimmerbeleuchtung ausgeführt. Das Licht der Lampe hatte keinen Einfluß auf die Dunkelstoßzahl des Lichtzählers, weil dieser im sichtbaren Teil des Spektrums sehr unempfindlich ist. Das von der Lampe ausgestrahlte Ultraviolett wurde von der sie umhüllenden Glasglocke vollständig absorbiert. Zur Prüfung der Frage, ob etwa das Licht im Zimmer einen Einfluß auf die Strahlung der Versuchsobjekte haben könnte,

3) S. Gurwitsch, Die mitogenetische Strahlung, S. 32.
4) S. Gurwitsch, Die mitogenetische Strahlung, S. 33.

wurden entsprechende Versuche bei völliger Verdunkelung des Zimmers angestellt. Diese zeigten aber dasselbe positive Resultat wie die Messungen bei eingeschalteter Zimmerbeleuchtung.

Auch nach einer vorhergehenden Bestrahlung der Versuchsobjekte mit einer Quecksilberquarzlampe oder einer Bogenlampe konnte ein stärkerer mitogenetischer Effekt nicht festgestellt werden, im Gegenteil, die Strahlung der Präparate ließ bedeutend nach. Diese Tatsache kann erklärt werden durch die von Gurwitsch[5]) beobachteten Depressionserscheinungen, die durch allzu große Reizwirkungen durch starke Lichtquellen verursacht werden können.

Am besten eigneten sich zum Nachweis der mitogenetischen Strahlen die Cotyledonen (Keimblätter) von Helianthuskeimlingen und die Helianthuswurzeln. Bei den Messungen wurde so verfahren, daß der Lichtzähler immer 3—5 Minuten lang mit den Strahlern beschickt wurde. Zwischendurch wurde während der entsprechenden Zeit die Zahl der Dunkelstöße bestimmt. Eine von den vielen Meßreihen, die mit Helianthuskeimlingen gemacht wurden, ist in der folgenden Tabelle wiedergegeben.

Stoßzahl bei Bestrahlung	Dunkelstoßzahl	Zeit in Minuten	Prozentuale Erhöhung der Stoßzahl
240		5	344%
	50	5	
110		5	101%
	60	5	
262		5	383%
	49	5	
241		5	345%
	51	5	
263		5	380%
	57	5	
113		5	109%
	53	5	
253		5	368%
	61	5	

Die Angaben für die prozentuale Erhöhung der Stoßzahl beziehen sich auf eine mittlere Dunkelstoßzahl von 54 Stößen pro 5 Minuten. Während der Zählung der Dunkelstöße wurden die Keimlinge in frisches Wasser gelegt, um ein Austrocknen zu verhüten.

Die ungewöhnlich hohe Stoßzahl erklärt sich dadurch, daß bei dieser Meßreihe der Lichtzähler der Strahlung von vier Keimlingen ausgesetzt wurde. Aber auch Vergleichsmessungen, die mit einzelnen Helianthuskeimlingen ausgeführt wurden, ergaben einen deutlichen Effekt von über 100 Prozent. Die Stoßzahlen bei Bestrahlung mit den Versuchsobjekten liegen bedeutend höher als dies bei den Un-

5) S. Gurwitsch, Die mitogenetische Strahlung, S. 185.

tersuchungen von Rajewsky der Fall war. Die Ergebnisse der Messungen wirken so überzeugend, daß an der Existenz und der Möglichkeit eines physikalischen Nachweises der mitogenetischen Strahlung nicht gezweifelt werden kann.

Versuche, die mit anderen Strahlungsobjekten durchgeführt wurden, zeigten ein weniger günstiges Ergebnis. Sie gaben jedoch einen immerhin noch deutlich nachweisbaren mitogenetischen Effekt.

Messungen an Zwiebelwurzeln ergaben eine Erhöhung der Stoßzahl gegenüber der Dunkelstoßzahl um 50 bis 120 Prozent. Dieselben Ergebnisse zeigten Versuche mit Zwiebelsohlenbrei. An abgeschnittenen Zwiebelwurzeln ließ sich eine mitogenetische Strahlung nicht nachweisen, während Zwiebelwurzeln, die mit der Sohle von der Knolle abgetrennt waren, einen deutlichen Effekt gaben. Dieser Versuch bestätigt die Auffassungen von Gurwitsch[6]), daß man als Strahlungszentrum der mitogenetischen Strahlung bei der Zwiebel die Zwiebelsohle ansehen muß.

Die Messungen bei der Bestrahlung des Lichtzählers mit Erbsenwurzeln ergaben Werte, die mit 32—112 Prozent über der Dunkelstoßzahl lagen. Die Strahlung von Hyazinthenwurzeln erhöhte die Stoßzahl um 25—110 Prozent. Keimende Kartoffelknollen gaben eine bedeutend geringere Strahlung. Die Erhöhung der Stoßzahl über den Dunkeleffekt betrug nur 12—56 Prozent.

Zum Nachweis der mitogenetischen Strahlung von tierischen Geweben wurden junge Kaulquappen von Rana esculenta benutzt. Aus der Kopfpartie der Kaulquappen wurde ein Brei hergestellt, der mit etwas Ringerlösung verdünnt wurde. Die Zunahme der Stoßzahl betrug bis zu 110 Prozent.

Alle Versuche, eine biologische Strahlung an Hefekulturen nachzuweisen, blieben erfolglos. Dieses negative Resultat mag auf den Umstand zurückzuführen sein, daß gerade bei Hefeagarkulturen der mitogenetische Effekt sehr stark durch sichtbares Licht beeinflußt wird. Aber auch nach längeren oder kürzeren Bestrahlungen der Kulturen mit einer Bogenlampe oder mit ultraviolettem Licht ergaben die Messungen immer ein negatives Resultat.

Wenn die Erhöhung der Stoßzahl gegenüber der Dunkelstoßzahl tatsächlich durch die von den Versuchsobjekten ausgehende mitogenetische Strahlung bedingt ist, so muß sich ein Unterschied in der Stoßzahl bemerkbar machen, je nachdem ob der Lichtzähler mit ein, zwei oder mehreren Wurzeln bestrahlt wird. Man kann natürlich keine strenge Proportionalität in der Zunahme der Stoßzahl verlangen, da die Intensität der Strahlung bei den einzelnen Individuen verschieden und den üblichen statistischen Schwankungen unterworfen ist. Versuche, die in dieser Richtung hin unternommen wurden, waren jedoch trotzdem immer erfolgreich, wie die folgende Tabelle zeigt:

---

6) S. Gurwitsch, Die mitogenetische Strahlung, S. 79 ff.

Zahl der Stöße			
mit einer Wurzel	mit zwei Wurzeln	Dunkelstoßzahl	Zeit in Minuten
50	98	34	3
37	65	29	3
48	87	31	3
78	82	36	3
54	102	34	3
47	71	33	3

Diese Versuche wurden mit Helianthuswurzeln ausgeführt, und zwar wurden zu jeder Messung immer andere Wurzeln benutzt. Um die Ergebnisse der bisherigen Messungen sicherzustellen, wurden diese Versuche in etwas anderer Form mit Cotyledonen von Helianthuskeimlingen wiederholt. Zunächst wurde die Strahlung von vier Keimlingen gemessen, darauf die von zweien dieser vier Keimlinge und zuletzt die Strahlung der beiden anderen Keimlinge. Zieht man von jeder Stoßzahl die Dunkelstöße ab, so muß die Summe der Stoßzahlen der beiden letzten Messungen wenigstens der Größenordnung nach gleich sein der Stoßzahl der ersten Messung.

In der folgenden Tabelle sind einige von diesen Messungen wiedergegeben. Die angegebenen Werte gelten für eine Meßdauer von 5 Minuten. Die dazugehörigen Dunkelstoßzahlen sind von den angeführten Zahlen schon in Abzug gebracht.

Zahl der Stöße			
I	II	III	IV
mit 4 Keimlingen	mit Keimling Nr. 1 u. 2	mit Keimling Nr. 3 u. 4	Summe von II u. III
183	56	87	143
206	101	92	193
113	18	102	120
215	126	98	224
158	28	77	105
146	57	101	158

Auch diese Versuche wurden mit verschiedenen Keimlingen durchgeführt; innerhalb einer jeden Meßreihe wurden natürlich dieselben Versuchsobjekte benutzt. Man sieht aus dem Ergebnis der Messungen, daß einzelne Keimlinge eine ziemlich starke Strahlung aussenden, während andere nicht oder nur wenig strahlen. Ein äußerer Unterschied in der Beschaffenheit der Keimlinge ist dabei nicht festzustellen.

Die Wellenlänge und Energie der mitogenetischen Strahlung.

Über die Wellenlänge der mitogenetischen Strahlung liegen eine Anzahl von Messungen vor. Nach Frank[7]) ist das Spektrum der mitogenetischen Strahlung von Muskeln beschränkt auf das Gebiet

7) S. Gurwitsch, Die mitogenetische Strahlung, S. 36.

zwischen 2000 bis 2400 AE. Chariton, Frank und Kannegießer (12) suchten die Wellenlänge der biologischen Strahlung dadurch zu bestimmen, daß sie das ganze ultraviolette Spektrum einer künstlichen Lichtquelle in seiner Wirkung auf die Mitosenzahl untersuchten. In voller Übereinstimmung mit den Untersuchungen von Frank fanden sie auch das von einer physikalischen Strahlungsquelle gewonnene Spektrum nur in dem Wellenlängenbereich von 1900 bis 2650 AE als mitogenetisch wirksam. Rajewsky fand ebenfalls das mitogenetische Strahlungsgebiet unterhalb 2500 AE.

Im Gegensatz dazu stehen die Versuche von Reiter und Gabor[8]). Sie fanden bei derselben Versuchsanordnung, wie sie Chariton, Frank und Kannegießer (12) benutzten, für die mitogenetische Strahlung einen Wellenlängenbereich um 3340 und 2800 AE.

Zur Prüfung dieser sich widersprechenden Ergebnisse wurde versucht, mittels Filter die Wellenlänge der mitogenetischen Strahlung festzulegen. Als Filter wurden ein Corning-Filter (Corex 986 A) von 5 mm Dicke und ein Glasfilter benutzt. Das Corning-Filter war unterhalb 2500 AE undurchlässig, und bei 2650 AE hatte es eine Durchlässigkeit von 25 Prozent. Das Glasfilter war unterhalb 2650 AE vollkommen undurchlässig.

Die Strahlung von Erbsenwurzeln, Zwiebelwurzeln und Kaulquappenbrei wurde durch das Corning-Filter nicht mehr durchgelassen; ihre Wellenlänge liegt also mit Sicherheit unterhalb 2500 AE.

Überraschenderweise zeigte sich das Corning-Filter jedoch für die Strahlung von Helianthuskeimlingen und Helianthuswurzeln als zum Teil durchlässig. Die durch das Filter hindurchgelassene Energie wurde von dem Lichtzähler mit einer Erhöhung der Stoßzahl um 18—78 Prozent über der Dunkelstoßzahl angezeigt, während bei denselben Keimlingen bei der Messung ohne Filter die Zunahme der Stoßzahl bis zu 364 Prozent betrug. Durch das Glasfilter war die Strahlung dieser Versuchsobjekte nicht mehr wirksam.

Berücksichtigt man die geringe Durchlässigkeit des Corning-Filters in dem Gebiet zwischen 2500 bis 2650 AE, so ergibt sich, daß jedenfalls der größte Teil der von Helianthuskeimlingen und -wurzeln ausgesandten Strahlung in dem Bereich von 2500—2650 AE liegt. Das Ergebnis wurde wiederholt nachgeprüft und immer wieder bestätigt gefunden.

Die Energie der mitogenetischen Strahlung wird von Rajewsky zu höchstens 100 Quanten/cm²sec angegeben, während Chariton, Frank und Kannegießer auf Grund ihrer Untersuchungen eine maximale Strahlungsenergie von $6{,}6 \cdot 10^5$ Quanten/cm²sec annehmen. Diese letzten Angaben sind sicherlich zu hoch.

Soweit man überhaupt aus den oben beschriebenen Versuchen über die Energie der mitogenetischen Strahlung Schlüsse ziehen darf, würde sich folgendes ergeben:

8) S. Gurwitsch, Die mitogenetische Strahlung, S. 34.

Auf Seite 9 war angegeben worden, daß der Spitzenlichtzähler eine Energie von 4 Quanten/cm²sec noch mit 24 Stößen gegenüber 11 Dunkelstößen anzeigt, das heißt: diese geringe Energie ergibt eine Erhöhung der Dunkelstoßzahl um 118 Prozent. Überträgt man diese Betrachtungsweise auf die Meßresultate, die man bei der mitogenetischen Strahlung erhält, so würde sich für die Strahlung eines einzelnen Versuchsobjekts die sehr geringe Energie von ungefähr 4 Quanten/cm²sec ergeben.

Diese Angaben sind jedoch nur richtig unter der Annahme, daß die Empfindlichkeit des Lichtzählers in dem Bereich der mitogenetischen Strahlung von 1900 bis 2650 AE dieselbe bleibt wie bei der Wellenlänge 2650 AE. Dieser Wert wird aber noch kleiner, wenn man berücksichtigt, daß man nach Messungen von Kreuchen (13) die Empfindlichkeit einer lichtelektrischen Schicht aus massivem Kadmium in dem Gebiet zwischen 2650 und 1900 AE noch größer annehmen darf als sie bei 2650 AE ist. Das würde aber bedeuten, daß in diesem Gebiet eine kleinere Energie als 4 Quanten/cm²sec ausreicht, um einen Stromstoß auszulösen. Nimmt man in diesem Bereich eine mittlere Zunahme der Empfindlichkeit um nur das 5-fache an, so würde sich für die Energie der mitogenetischen Strahlung der sehr geringe Betrag von einem Quant/cm²sec ergeben.

Allerdings muß man bei diesen Berechnungen auch bedenken, daß die Stoßzahl nicht proportional der Empfindlichkeit oder, was gleichbedeutend ist, der eingestrahlten Energie zunimmt.

Wenn man auch auf Grund der beschriebenen Versuche keine genauen quantitativen Angaben über die Energie der mitogenetischen Strahlung machen kann, so geht doch daraus hervor, daß der von Rajewsky angegebene Wert einer maximalen Strahlungsenergie von 100 Quanten/cm²sec eher noch zu hoch als zu niedrig angenommen ist.

Zusammenfassung.

1. Es wird ein empfindlicher Spitzenlichtzähler beschrieben, dessen Empfindlichkeit im ultravioletten Bereich so groß ist, daß für die Wellenlänge 2650 AE eine Energie von 4 Quanten/cm²sec noch einwandfrei nachgewiesen werden kann.

2. Mit Hilfe dieses Lichtzählers wurde die mitogenetische Strahlung an verschiedenen biologischen Objekten mit Sicherheit nachgewiesen. Die prozentuale Erhöhung der Stoßzahl gegenüber dem Dunkeleffekt betrug dabei bis zum Zehnfachen der von Rajewsky gefundenen Werte.

Herrn Professor Dr. L. Grebe bin ich für die Anregung zu dieser Arbeit und sein stetes Interesse zu größtem Dank verpflichtet.

LITERATURVERZEICHNIS.

1. H. Geiger und W. Müller, Das Elektronenzählrohr. Phys. Ztschr. Bd. 29, 1928. Technische Bemerkungen zum Elektronenzählrohr. Phys. Ztschr. Bd. 30, 1929, S. 489.
2. B. Rajewsky, Anordnung zur Messung kleinster Lichtintensitäten. Ztschr. f. Physik, Bd. 63. 1930, S. 576. Über einen empfindlichen Lichtzähler. Phys. Ztschr. Bd. 32, 1931, S. 121.
3. K. W. Hausser und K. H. Kreuchen, Quantenausbeuten bei Lichtzählern. Ztschr. f. techn. Physik, Bd. 15, 1934, S. 20.
4. K. H. Kreuchen, Messung geringer Lichtintensitäten mit Hilfe von Zählrohren. I. Ztschr. f. Physik, Bd. 94, 1935, S. 549.
5. B. Rajewsky, Weitere Erfahrungen mit dem Lichtzähler. Ann. der Physik, (5), Bd. 20, 1934, S. 13.
6. B. Bachem, Anwendung des Geiger-Müller-Zählrohres im Bereich des ultravioletten Lichts. Diss. Bonn, 1934.
7. B. Sturm, Eine neue Ausführungsform des Geigerschen Spitzenzählers zur Lichtmessung. Ztschr. f. Physik, Bd. 94, 1935, S. 85.
8. W. Bothe, Vereinfachung von Koinzidenzzählungen. Ztschr. f. Physik, Bd. 59, 1930, S. 1.
9. E. Greiner, Über die Ausbreitung der Entladung im Elektronenzählrohr. Ztschr. f. Physik, Bd. 81, 1933, S. 545.
10. W. Gerlach, Die Gesamtstrahlung der Hefnerlampe absolut gemessen. Phys. Ztschr. Bd. 14, 1913, S. 577.
11. A. Gurwitsch, Das Problem der Zellteilung. Berlin 1926.
    A. Gurwitsch, Die mitogenetische Strahlung. Berlin 1932.
12. J. Chariton, G. Frank und N. Kannegießer, Über die Wellenlänge und Intensität mitogenetischer Strahlung. Naturwissenschaften, Bd. 18, 1930, S. 411.
13. K. H. Kreuchen, Messung geringer Lichtintensitäten mit Hilfe von Zählrohren. II. Ztschr. f. Physik, Bd. 97, 1935, S. 625.

LEBENSLAUF.

Ich, Aloys Krost, wurde am 10. Juni 1914 als Sohn des Lehrers Jakob Krost und seiner Ehefrau Magdalena, geb. Meyer, zu Roth Kreis Daun geboren. Ich bin katholischer Konfession. Von Ostern 1919 bis Ostern 1925 besuchte ich die Volkschule in Roth und dann das humanistische Gymnasium in Prüm (Eifel). Dort erhielt ich Ostern 1932 das Zeugnis der Reife.

Im Sommersemster 1932 und Wintersemester 1932/33 war ich an der Universität Bonn immatrikuliert. Im Sommersemester 1933 studierte ich an der Universität Innsbruck. Seit dem Wintersemester 1933/34 besuchte ich wieder die Universität Bonn. Im Anschluß an das Praktikum für Fortgeschrittene legte ich zu Ende des Wintersemesters 1934/35 das physikalische Verbandsexamen ab und widmete mich seit Beginn des Sommersemesters 1935 der Anfertigung der vorliegenden Arbeit.

Die mündliche Doktorprüfung fand am 24. Juni 1936 statt.